

Optimale Fahrstrategie im dichten Verkehr

Lukas Benninger, Oliver Sawodny

Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
Waldburgstraße 19
70563 Stuttgart
benninger@isys.uni-stuttgart.de
sawodny@ isys.uni-stuttgart.de

Abstract: Die Entwicklung intelligenter Fahrerassistenzsysteme stellt einen wichtigen Forschungsschwerpunkt in der Automobilindustrie dar. Ein elementarer Bestandteil davon liegt in der Fahrstrategie, die den Fahrer hinsichtlich einer vorrausschauenden und energieeffizienten Geschwindigkeitswahl unterstützt. Um auch während der Fahrt auf äußere Einflüsse, die durch weitere Verkehrsteilnehmer hervorgerufen werden, reagieren zu können, muss dabei der aktuelle Verkehrsfluss berücksichtigt werden. Neben gewöhnlichen ACC-Folgeregelungen spielen auch optimierungsbasierte Ansätze eine immer größere Rolle. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird eine globale Optimierung vorgestellt, die für einen allgemeinen Antriebsstrang eine energieoptimale Geschwindigkeitswahl berechnet. Hierfür wird vorausgesetzt, dass das Fahrverhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs über den betrachteten Zeithorizont bekannt ist. In exemplarischen Anwendungsfällen wird dabei das mögliche Energieeinsparpotential aufgezeigt. Die entwickelten Algorithmen sollen in nachfolgenden Arbeiten auf modellbasierte Geschwindigkeitsvorhersagen angewendet werden.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurde die Entwicklung von Fahrerassistenzfunktionen stark vorangetrieben, um auch im Hinblick auf autonom fahrende Fahrzeuge gerüstet zu sein. Hauptziel der Assistenzfunktionen ist die Unterstützung des Fahrers hinsichtlich Sicherheit, Komfort und Effizienz. Einen wichtigen Bereich stellen dabei die adaptiven Tempomaten dar, die eine vorausschauende Geschwindigkeit planen.

Unter der Verwendung von statischen Kartendaten können beispielsweise energieoptimale Geschwindigkeitstrajektorien berechnet werden, die auf Geschwindigkeitsbeschränkungen, Kurvenradien und das Höhenprofil angepasst sind [1]. Mithilfe solcher Funktionen lassen sich, bei gleichzeitiger Optimierung der Betriebsstrategie, Energieeinsparungen im Bereich von 10-20% erzielen [2].

Für die Anwendung solcher Algorithmen ist jedoch vorausgesetzt, dass keine Störung durch weitere Verkehrsteilnehmer stattfindet und das berechnete Geschwindigkeitsprofil wie geplant umgesetzt werden kann. Da diese Voraussetzung insbesondere im dichten Verkehr nicht erfüllt ist, wird eine Berücksichtigung weiterer Beschränkungen notwendig. Typischerweise kommen hier Abstandsregeltempomaten (Adaptive Cruise Control, ACC) zum Einsatz, die dem vorausfahrenden Fahrzeug mit einem vorgegebenen Abstand folgen [3]. Bei diesem Fahrzeugfolgeverhalten besteht ein großes Optimierungspotential, da insbesondere Geschwindigkeitsschwankungen im dichten Verkehr durch eine vorausschauende Fahrstrategie ausgeglichen werden können.

Im Folgenden werden daher energieoptimale Geschwindigkeitstrajektorien in dichten Verkehrssituationen berechnet und das zugehörige Einsparpotential angegeben. Die angestellten Untersuchungen sollen in diesem Rahmen möglichst unabhängig von konkreten Fahrzeugtypen durchgeführt werden, sodass die Ergebnisse auf unterschiedliche Antriebsarten angewendet werden können. Dazu wird eine allgemein gültige Energiebetrachtung verwendet und es wird vorausgesetzt, dass das Geschwindigkeitsprofil des vorausfahrenden Fahrzeugs über den betrachteten Zeithorizont bekannt ist.

In Kapitel 2 werden zunächst exemplarische Verkehrsszenarien vorgestellt, die für die weiteren Untersuchungen verwendet werden. Anschließend wird in Kapitel 3 das verwendete Fahrzeugmodell eingeführt und in Kapitel 4 ein gewöhnlicher ACC Ansatz als Vergleich eingeführt. Die anschließende Optimierung wird in Kapitel 5 beschrieben, deren Simulationsergebnisse in Kapitel 6 interpretiert werden.

2 Exemplarische Verkehrsszenarien

Typische Verkehrssituationen, in denen das eigene Fahrverhalten durch weitere Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird, sind das Fahren im dichten städtischen Verkehr, der Stop&Go-Verkehr auf Autobahnen oder das Auffahren auf ein Stauende. Für eine allgemeine Untersuchung werden hierfür verschiedene Sinusschwingungen betrachtet, die Schwankungen im Geschwindigkeitsverlauf abbilden. Um möglichst unterschiedliche Verkehrsszenarien abzudecken, werden die Untersuchungen für variable Amplituden, Frequenzen und Durchschnittsgeschwindigkeiten V der Schwingung durchgeführt.

Anhand von vorliegenden Messdaten, wurde die Periodendauer T einer Schwingung zwischen 30s und 45s gewählt. Die zugehörige Amplitude A der Schwingung wurde in einem Bereich zwischen 5km/h und 10km/h variiert.

$$v_{\text{Lead}}(t) = V + A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

Das definierte Geschwindigkeitsprofil wird als bekannte Geschwindigkeit eines virtuell vorausfahrenden Fahrzeugs interpretiert. Es wird jeweils ein Szenario mit einem Zeitraum von ca. 15 Minuten simuliert.

3 Modellierung der Fahrzeugdynamik

Die Dynamik der Fahrzeuggeschwindigkeit wird durch die longitudinale Bewegung des Fahrzeugs beschrieben. Mit Hilfe des Impulssatzes wird das Kräftegleichgewicht am Fahrzeug gebildet und die resultierende Beschleunigung nach [4] aufgestellt. Neben der Vortriebskraft des Antriebsstrangs, sind auch die Fahrwiderstandskräfte relevant. Diese setzen sich aus den Anteilen Rollwiderstand F_{rol} , Luftwiderstand F_{drg} und Steigungswiderstand F_{slp} zusammen und werden mit den Gleichungen

$$F_{\text{rol}} = c_{\text{rol}}mg \cos(\gamma)$$

$$F_{\text{drg}} = c_{\text{drg}}v(t)^2$$

$$F_{\text{slp}} = mg \sin(\gamma)$$

modelliert. Darin sind die Parameter m_{veh} für die Fahrzeugmasse, g für die Erdbeschleunigung, c_{rol} für die Reibungswiderstände, c_{drg} für den Luftwiderstand und der Steigungswinkel der Fahrbahn γ enthalten. Für die nachfolgenden Simulationen wird ein steigungsfreier Streckenabschnitt angenommen, womit die folgende Fahrzeugdynamik resultiert

$$\begin{aligned} \frac{ds(t)}{dt} &= v(t) \\ \frac{dv(t)}{dt} &= a(t) = \frac{1}{m_{\text{veh}}} (F_{\text{PT}} - F_{\text{rol}} - F_{\text{drg}}) \end{aligned}$$

Die darin enthaltene Kraft des Antriebsstrangs F_{PT} wird allgemein gültig formuliert, sodass die nachfolgenden Untersuchungen unabhängig vom vorliegenden Antriebsstrang sind. Eine Abschätzung des Verbrauchs erfolgt daher über eine Näherung der aufgebrauchten Energie, die für die Überwindung der Fahrwiderstandskräfte und die Beschleunigung des Fahrzeugs notwendig ist. Die Bestimmung erfolgt mit dem zeitlichen Integral über die Antriebsleistung P_{PT} im betrachteten Zeithorizont $t \in [t_0, t_f]$

$$W = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{PT}}(t) dt = \int_{t_0}^{t_f} F_{\text{PT}}(t)v(t) dt$$

4 Fahrzeugfolgeregelung

In der Regel wird bei Tempomaten die Kontrolle entweder direkt an den Fahrer übergeben, sobald die Funktion durch ein vorausfahrendes Fahrzeug gestört wird, oder eine abstandsbaasierte Folgeregelung wird aktiviert. Eine solche Folgeregelung wird in dieser Arbeit zusätzlich als Vergleichsstrategie betrachtet und wie in [3] umgesetzt. Dabei wird sowohl die Geschwindigkeit als auch der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug eingeregelt. Voraussetzung hierfür ist, dass der Abstand und die relative Geschwindigkeit als Messsignale verfügbar sind, was in den meisten Fahrzeugen durch die verbaute Radar- oder Kamertechnik umgesetzt wird.

Für die Berechnung der notwendigen Fahrzeugbeschleunigung $a(t)$ wird in [3] die Gleichung

$$a(t) = \frac{1}{\tau_v} \left(v_{rel}(t) - \frac{d_{set} - d(t)}{\tau_d} \right)$$

eingeführt, mit der relativen Geschwindigkeit $v_{rel} = v_{Lead} - v_{Ego}$ und dem aktuellen Abstand $d(t)$. Hierbei steht v_{Lead} für die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs und v_{Ego} für die eigene Fahrzeuggeschwindigkeit. Zusätzlich sind die Zeitkonstanten τ_d und τ_v als Regelparameter vorhanden, um das Einschwingverhalten anzupassen. Diese werden wie in [3] zu $\tau_v = 1.5s$ und $\tau_d = 13.3s$ gewählt, sodass neben einem dämpfenden Einschwingverhalten auch Kolonnenstabilität für jegliche Anregungen gewährleistet ist. Die Wahl des Sollabstandes d_{set} kann entweder als konstanter Wert oder als geschwindigkeitsabhängige Sollzeitlücke definiert werden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde ein Sollzeitabstand von $\tau_{set} = 2s$ definiert. Somit gilt $d_{set}(t) = \tau_{set} v_{Ego}(t)$.

5 Globale Optimierung mittels Dynamischer Programmierung

Ziel dieses Abschnitts ist die Bestimmung einer Geschwindigkeitstrajektorie, die einen minimalen Energieverbrauch über den betrachteten Zeithorizont aufweist. Um das globale Minimum des Optimierungsproblems zu ermitteln und gleichzeitig beliebige Nichtlinearitäten in den Systemgleichungen und Nebenbedingungen einbinden zu können, wird das Verfahren der Dynamischen Programmierung gewählt. Hierbei handelt es sich um ein weit verbreitetes Optimierungsverfahren, welches auf dem Bellmanschen Optimalitätsprinzip beruht [5]. Dieses besagt, dass Resttrajektorien optimaler Pfade immer optimal sein müssen. Folglich kann das Optimierungsproblem in kleine Unterprobleme aufteilt werden, für die jeweils die Übergangskosten in diskretisierten Zuständen bestimmt werden. Durch eine Rückwärtsiteration kann anschließend der Pfad mit den geringsten Kosten ermittelt werden.

Je nach Wahl der Diskretisierungspunkte, steigt der Rechenaufwand stark an und kann zu langen Rechenzeiten führen. Um den betrachteten Zustandsraum möglichst klein zu halten und damit den Rechenaufwand der Optimierung zu reduzieren, wird eine Koordinatentransformation der absoluten Position in die relative Position als Abstand durchgeführt

$$d(t) = s_{\text{lead}}(t) - s(t)$$

Dadurch entfällt die Diskretisierung der gesamten abgefahrenen Strecke und es wird lediglich der Abstand zwischen den betrachteten Fahrzeugen diskretisiert, welcher auf 100m begrenzt wird. Diese Vorgabe wird gewählt, damit der Abstand nicht zu groß wird und im mehrspurigen Verkehr ein Einscheren anderer Fahrzeuge vermieden wird. Zusätzlich zu der Vorgabe des maximalen Abstands, wird der minimale Abstand, wie gesetzlich vorgegeben, ab einer Geschwindigkeit von 50km/h auf 50m begrenzt. Unterhalb von 50km/h werden bis zu 5m zugelassen. Für die Vergleichbarkeit der Optimierungsergebnisse wird zudem gefordert, dass die Geschwindigkeit am Ende des Optimierungshorizonts auf $\pm 5\text{km/h}$ mit der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs übereinstimmt.

Für die Berechnung des Energiebedarfs wird die in Abschnitt 3 eingeführte Berechnung verwendet. Da lediglich der positive Anteil des Energieflusses für den Verbrauch relevant ist, fließt nur die vom Antriebsstrang bereitgestellte, positive Kraft in die Kostenfunktion ein.

Das resultierende Optimierungsproblem wird durch die nachfolgenden Gleichungen zusammengefasst:

$$\min_{F_{\text{PT}}} = \int_{t_0}^{t_f} F_{\text{PT}}^+ v(t) dt \quad \text{mit } F_{\text{PT}}^+ = \begin{cases} F_{\text{PT}} & F_{\text{PT}} \geq 0 \\ 0 & F_{\text{PT}} < 0 \end{cases}$$

sodass

$$\begin{aligned} \frac{dd(t)}{dt} &= v_{\text{Lead}}(t) - v(t) \\ \frac{dv(t)}{dt} &= \frac{1}{m_{\text{veh}}} (F_{\text{PT}} - F_{\text{rol}} - F_{\text{drg}}) \\ d(t_0) &= 50 \\ v(t_0) &= v_{\text{Lead}}(0) \\ d(t) &> 5 \\ d(t) &> 50 \quad \text{wenn } v(t) > 50\text{km/h} \\ |v(t_f) - v_{\text{Lead}}(t_f)| &< 5\text{km/h} \end{aligned}$$

Da die aktuellen Untersuchungen nicht auf einen konkreten Fahrzeugtyp abgestimmt sind, wird noch kein mögliches Rekuperationspotential berücksichtigt, welches bei Hybridfahrzeugen zu erwarten ist. Folglich muss die Kostenfunktion bei Fahrzeugen mit Möglichkeit zur Rekuperation mit einem anteilig negativen Term für eine Energierückgewinnung erweitert werden.

6 Simulationsergebnisse

Anhand der in Abschnitt 2 eingeführten Use-Cases wird sowohl eine Simulation mit ACC-Folgeregelung, als auch mit der optimierten Geschwindigkeitstrajektorie durchgeführt. Die Ergebnisse sind beispielhaft für eine Sinusschwingung mit Periodendauer 40s und einer Amplitude von 7.5km/h bei 60km/h in Abbildung 1 dargestellt.

Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die optimierte Trajektorie eine deutlich reduzierte Schwingung im Geschwindigkeitsverlauf aufweist. Dadurch werden die Beschleunigungsphasen reduziert, was wiederum zu einer Verringerung der benötigten Energie führt. Gleichzeitig geht damit eine größere Schwankung im Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einher, da dessen Verhalten nicht so strikt nachgefahren wird, wie beispielsweise bei der ACC Folgeregelung. Jedoch ergibt sich auch beim ACC-Verhalten ein leicht reduzierter Energiebedarf um etwa 3% durch das dämpfende Verhalten der Übertragungsfunktion des Reglers. Insgesamt beläuft sich die eingesparte Energiemenge auf ca. 25% mit der optimierten Trajektorie.

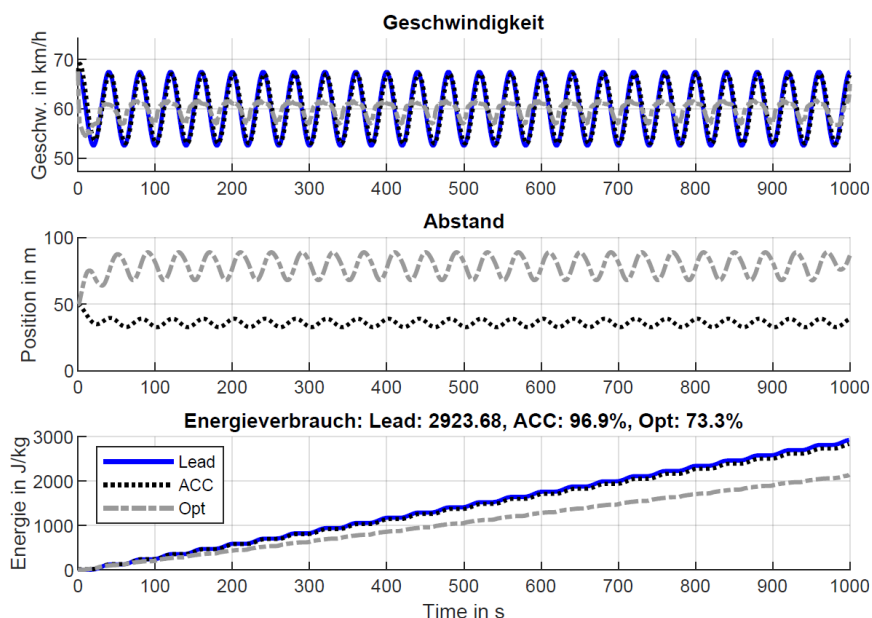


Abbildung 1: Geschwindigkeit, Abstand und Energiebedarf von Folgeregelung (ACC) und Optimierung (Opt) bzgl. der Referenz (Lead) mit $V=60\text{km/h}$, $A=7.5\text{km/h}$ und $T=40\text{s}$.

In weiteren Szenarien mit variierenden Parametern der Sinusschwingung ergeben sich abweichende Energieverbräuche. Offensichtlich hängt das mögliche Einsparpotential beim Energieaufwand von dem betrachteten Szenario ab. In einer Reihe von Optimierungen wird der in Abbildung 2 dargestellte Zusammenhang beobachtet.

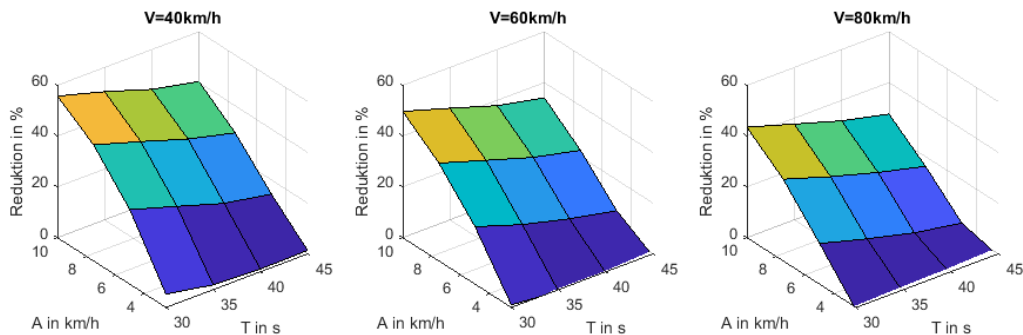


Abbildung 2: Darstellung des prozentualen Einsparpotentials im schwingenden Verkehr, abhängig von Amplitude und Periodendauer.

Mit zunehmender Amplitude nimmt das mögliche Einsparpotential zu, da das schwingende Verhalten stärker reduziert werden kann und schwächere Beschleunigungsvorgänge anfallen. Zudem kann der Energieverbrauch stärker reduziert werden, wenn die Frequenz der Schwingung zunimmt. Zum einen ist die benötigte Beschleunigung dann größer und zum anderen treten mehr Schwingungsvorgänge im betrachteten Intervall auf. Außerdem fällt das Einsparpotential bei niedrigen Geschwindigkeiten höher aus, weil der Anteil der Fahrwiderstandskräfte verhältnismäßig geringer ist.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse für eine reale, aufgezeichnete Messfahrt dargestellt. Bei der aufgezeichneten Messfahrt tritt ein Stauszenario auf, bei dem die Geschwindigkeit kurzzeitig von 80km/h auf 20km/h reduziert wird und Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzanteilen auftreten. Durch eine Optimierung des Folgeverhaltens mittels Dynamischer Programmierung wird ein Einsparpotential von 18% ermittelt.

Für die Übertragbarkeit auf eine reale Implementierung ist wichtig zu erwähnen, dass hier das exakte Verhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs bekannt sein muss. Da dies in der Realität nicht der Fall ist, wird sich das tatsächliche Einsparpotential entsprechend verringern. Umso wichtiger ist deshalb eine möglichst gute Vorhersage für das Verkehrsverhalten auf dem vorausliegenden Streckenabschnitt. In einem weiteren Schritt soll daher mit einem verteiltparametrischen Verkehrsflussmodell eine Prognose des Geschwindigkeitsverlaufs erstellt werden, die als Eingang für die Optimierung verwendet werden kann.

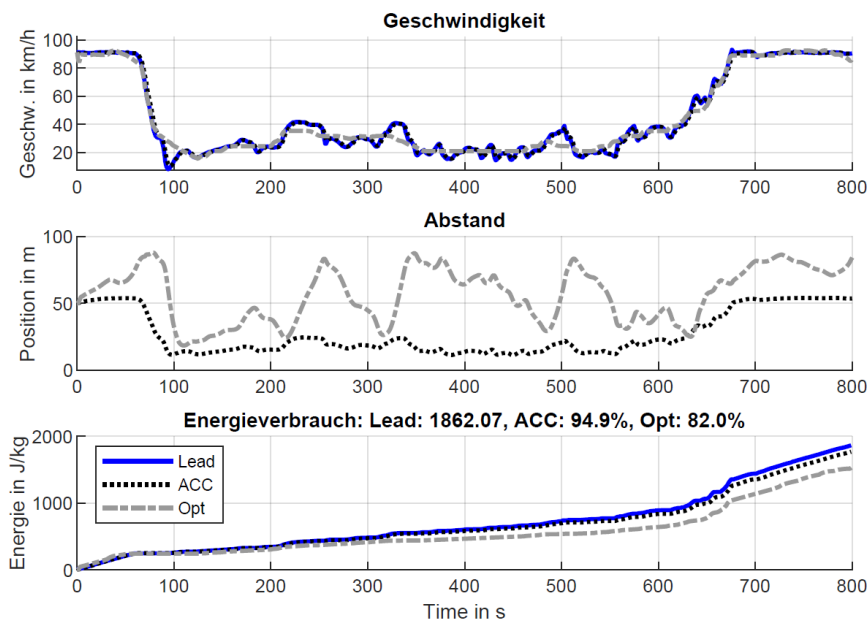


Abbildung 3: Geschwindigkeit, Abstand und Energiebedarf von Folgeregelung (ACC) und Optimierung (Opt) bzgl. der Referenz (Lead) aus einer realen Messfahrt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Wahl, H.-G. „Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen“. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.
- [2] Radke, T. „Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien“. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013.
- [3] Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. und Singer, C. Handbook of Driver Assistance Systems: Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer Publishing Company, Incorporated, 2015.
- [4] Guzzella, L. und Sciarretta, A. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [5] Bertsekas, D. P. Dynamic programming and optimal control. Bd. 1. Belmont: Athena Scientific, 2005.